

Desde que aparecieron los tractores CVT en el mercado nacional, he seguido con pasión esta tecnología, sus continuos avances y los modelos que iban apareciendo. Para comprenderla, he buscado ansiosamente todo lo que había sobre el tema. Existe documentación comercial, opiniones (siempre favorables) de los usuarios y sesudos trabajos de investigación, pero de temas puntuales. Faltaba un trabajo unificador que reuniera todos los aspectos de esta tecnología. Recientemente (Febrero 2005), he tenido ocasión de leer un impresionante trabajo de análisis y descripción de los conceptos básicos que definen estos tipos de transmisiones. Se trata de un documento publicado por la Asociación Americana de Ingenieros Agrónomos, ASAE, que tan buena labor hace en la promoción y difusión de la tecnología agraria. El documento, patrocinado por Deere & Co, corresponde al nº 29 de la serie denominada *Distinguished Lecture Series* y se denomina *Continuously Variable Tractor Transmissions*. Sus autores son el profesor Karl Th. Renius y el Dr. Rainer Resch. El Doctor Karl Th. Renius, profesor en la Technical University Munich (TUM), es un gran

especialista alemán en tractores agrícolas, que se ha permitido, entre otras cosas, diseñar un tractor CVT. Por su parte, Rainer Resch es Doctor Ingeniero en Máquinas y realizó su tesis doctoral sobre transmisiones CVT (impresionante, por cierto), para pasar después a la empresa AVL especializada en diseño de componentes para automoción y herramientas de simulación, entre las que se encuentran los programas de análisis de las propias transmisiones CVT.

Como se puede ver, los autores dan confianza para acoger el documento y su lectura no defrauda: 37 páginas llenas de ciencia aplicada y adornadas con 42 figuras, 5 tablas y 92 referencias para documentarse.

Los autores han hecho una síntesis de su trabajo (IVT, Internacional, 2005) para que los lectores interesados que no tengan ocasión de acceder al documento completo de ASAE, puedan hacerse una pequeña idea del mismo. Me hace mucha ilusión participar en la transmisión (nunca mejor dicho) de este resumen a los lectores de *agrotécnica*, en cuyas páginas ya he tenido ocasión de publicar otros trabajos sobre el tema.

PILAR LINARES

TRANSMISIONES:

Están con nosotros desde hace 100 años, pero ha sido recientemente cuando están teniendo un gran impacto. Hagamos un resumen de la historia, conceptos, estado del mercado y futuras tendencias de las transmisiones CVT

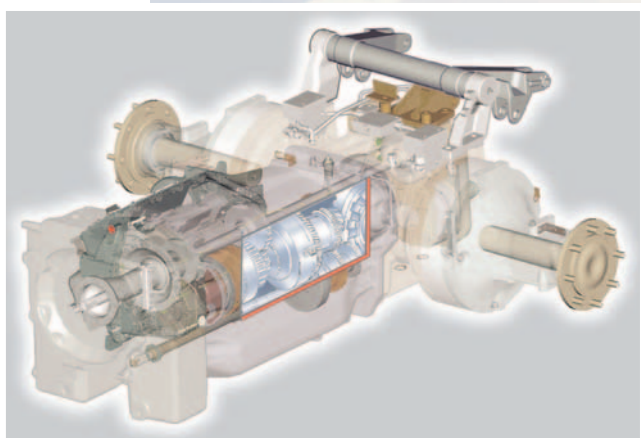
Historia

Los vehículos CVT tienen ya casi 100 años, puesto que ya en 1907 hubo dos importantes propuestas de este tipo de transmisiones. Louis Renault presentó

en Alemania la patente 222301 sobre un automóvil CVT con ramificación interna mecánica-hidrostática de la potencia, mientras la empresa Stock presentó un moto-arado (que se puede contemplar actualmente en el museo de tecnología de Munich), con un concepto similar (Figura 1).

La transmisión CVT de Renault era de tipo mecánico, usando el principio de fricción, y servía también para gobernar el sistema de dirección. La CVT de Stock se construyó sólo como prototipo, pero la idea del moto-arado fue un gran éxito en Europa durante dos décadas.

En 1954 se presentó el famoso *Silsoe Research Tractor*, incorporando una transmisión hidrostática CVT que usaba una bomba de pistones axiales con cilindrada variable para accionar motores de pistones radiales integrados en las ruedas traseras del tractor. Los resultados animaron a muchas empresas para desarrollar prototipos, como International Harvester, que fabricó unas 10 000 unidades, pero todos los esfuerzos, finalmente, fallaron. Las razones fueron la baja eficiencia (consumo específico elevado), alto coste y elevados niveles de ruido. Como las transmisiones bajo carga escalonadas se popularizaron, la aplica-



EN MEJORA CONTINUA

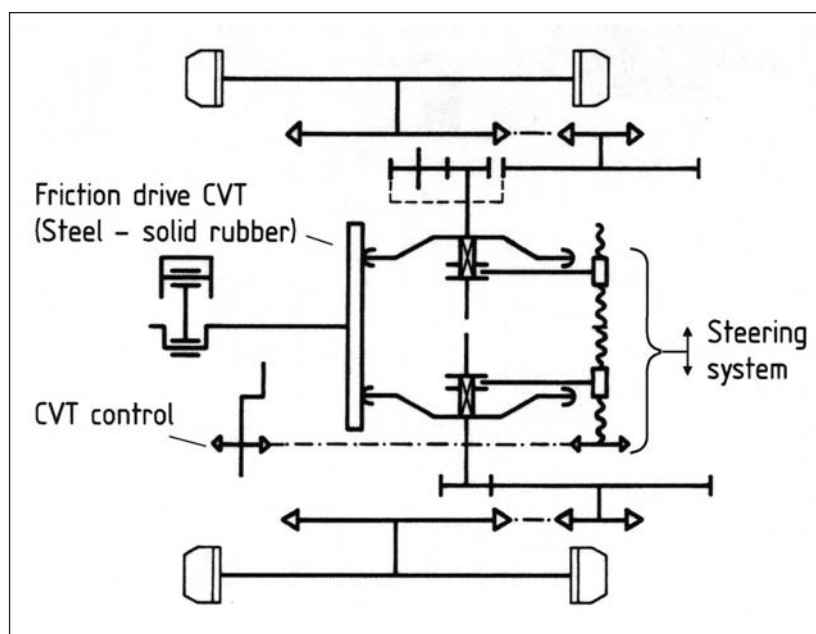


FIGURA 1: Transmisión CVT Stock, construida sólo como prototipo, usando el principio de fricción.

ción de las CVT a los tractores agrícolas se estancó.

El *Munich Research Tractor*, presentado en 1988 y equipado con una transmisión CVT mecánica, supuso un impulso para renovar el desarrollo de nuevas ideas, principalmente en Alemania. El tractor usaba un variador mecánico PIV de alta eficiencia y el éxito de esta innovación favoreció otros desarrollos, principalmente los de Steyr, ZF y John Deere (la empresa Steyr Transmission ha sido absorbida por ZF en el año 2000). El tractor CVT, equipado con avanzadas estrategias automáticas de control es ya una realidad en los países desarrollados.

TABLA 1.- EFICIENCIA DE LAS TRANSMISIONES CVT HIDRODINÁMICA, MECÁNICA, HIDROSTÁTICA Y ELÉCTRICA

Tipo CVT	Principio de transmisión de la energía	Control de la relación de transmisión	Aplicación	Eficiencia
Hidrodinámica	Fuerzas sobre masas en bomba y turbina	Por lo general, automáticamente en función de la carga	Importante para automóviles y maquinaria de construcción	Baja
Mecánica	Fuerzas de tracción con rozamiento entre superficies de fricción	Radio del punto de aplicación de la fuerza de tracción	Importante para automóviles	Excelente
Hidrostática	Fuerzas hidrostáticas en bomba(s) y motor(es)	Cilindrada de las unidades hidráulicas	Importante para maquinaria móvil	Moderada
Eléctrica	Fuerzas electromagnéticas en generador y motor eléctrico	Frecuencia de la corriente o flujo eléctrico	Futura	Moderada

Los tractores CVT necesitan tecnologías de vanguardia

El tractor agrícola moderno es mucho más complicado de lo que muchos creen. Las demandas del mercado fueron analizadas en el estudio que constituyó la base de la conferencia de los autores en la reunión de ASAE celebrada en Kentucky, en Febrero de 2005 (*ASAE Agricultural Equipment Technology Conference*).

Estas demandas incluyen velocidad, eficiencia, estrategias automáticas de control y modo de respuesta ante variaciones de

la carga, entre otros. La velocidad puede variar entre 25 km/h marcha atrás y 50 km/h (60 km/h en un futuro próximo) marcha adelante, con un inversor bajo carga y un sistema preciso de control de la parada activa.

Los rendimientos deben ser considerablemente mayores para los tractores agrícolas que para otras máquinas móviles. La Figura 2 representa una curva de objetivos publicada por Renius en 1993. Aunque ambiciosa, se convirtió en una referencia ampliamente utilizada para transmisiones CVT en tractores de más de 100 kW de potencia nominal. Conseguir una eficiencia del

84% para velocidades de 6-12 km/h requiere, por ejemplo, una eficiencia en la unidad CVT de, al menos, el 90-92%, puesto que las pérdidas adicionales en la caja de gamas, reducciones finales, frenos y otros elementos están incluidos en el objetivo.

Las exigencias de cargas sobre las transmisiones son mayores en los tractores CVT que en los tractores convencionales, porque los sistemas de control de la carga automáticos y en toda la gama de cargas crea mayores niveles de exigencia que las de control manual. Los sistemas existentes para el cálculo y ensayo de las transmisiones tienen que ser revisados. El documento ofrece una estimación de los cambios producidos en los espectros de cargas sobre las transmisiones.

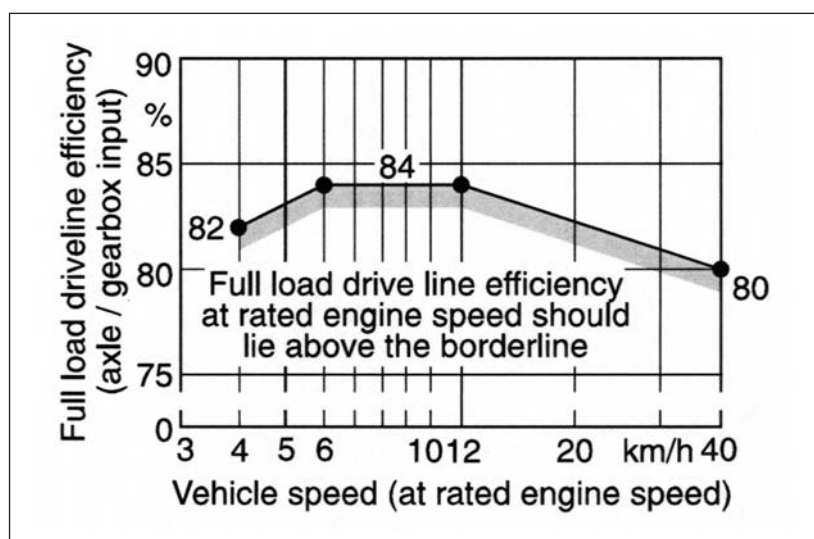


FIGURA 2: Requisitos de eficiencia en las transmisiones CVT para tractores de más de 100 kW
 Eje Horizontal : Velocidad del vehículo (al régimen nominal del motor)
 Eje Vertical : Eficiencia total de la transmisión (motor/ruedas)
 En el interior : La eficiencia al régimen nominal del motor debe estar por encima de la línea

Tipos de transmisiones CVT

El estudio de los principios de funcionamiento de las transmisiones CVT incluye 4 grupos (Tabla 1). Las transmisiones hidrodinámicas (convertidores de par) no tienen aplicación en los tractores agrícolas. Las eficiencias máximas que consiguen no son bajas, pero sólo se pueden conseguir en un intervalo muy pequeño de relaciones de transmisión. Una

TABLA 2.- APLICACIÓN Y POTENCIAL DE FUTURO DE LAS TRANSMISIONES CVT MECÁNICAS, HIDROSTÁTICAS Y ELÉCTRICAS

Tipo	Ventajas	Inconvenientes	Comentarios
Mecánicas por fricción directa	Alta eficiencia Bajo nivel de ruido	No empieza desde cero Limitaciones de potencia (cadenas)	Correas tipo empuje en coches japoneses Correas tipo tracción: Audi Cadena-Luk (2000) Toroidal Nissan (1999)
Mecánicas con ramificación de la potencia	Comienzo desde cero Bajo nivel de ruido	Eficiencia puede ser menor que en la directa	Prototipos conocidos con el nombre de 'engrane neutral'
Hidrostáticas 'directas'	Larga experiencia, alto confort	Baja eficiencia Alto nivel de ruido	Populares para pequeños tractores y 'orugas'
Hidrostática con ramificación de la potencia	Alta eficiencia	Ruido Flexibilidad limitada Cambio puede ser complicado Coste elevado de I+D	Claas HM8 (1996) Fendt vario (1996) Steyr S-Matic (2000) ZF Eccom 1.5 (2001) John Deere/USA (2001)
Eléctricas con motor diésel	Bajo nivel de ruidos Alto confort	Cara Baja eficiencia	Diversas investigaciones en variadores y cajas
Eléctricas con pila de combustible	Bajo nivel de ruido Alto confort	Muy cara Motor extra para TDF Coste elevado de I+D	Posibilidades a largo plazo ¿Uso comercial en 2022?
Potencia eléctrica + Motor diésel	Alta eficiencia Bajo nivel de ruido	Cara Coste elevado de I+D	A nivel de investigación ¿uso comercial en 2012?

segunda desventaja es su limitada capacidad de control, lo cual es un requisito para la gestión de las transmisiones más avanzadas.

Sólo las transmisiones mecánicas, hidroestáticas y eléctricas parecen ser aplicables en el tractor. El estado actual se su aplicación y su futuro potencial se presentan en la tabla 2, que también incluye su aplicación al sector de la automoción.

Las mejores eficiencias (claramente superiores al 90% en el mejor punto de funcionamiento de la unidad CVT) se consiguen con los variadores mecánicos de cadenas. En la figura 3 aparece un típico mapa de eficiencias medidos en la Universidad Técnica de Munich para transmisiones de un prototipo de tractor. Audi-Luk ha utilizado este sistema para producir alrededor de 500 000 transmisiones *multitronic* desde el año 2000 a marzo de 2005.

Las transmisiones CVT hidroestáticas directas (unidad hidroestática sola, sin reducción final y ejes) sólo alcanzan eficiencias del 80%. Son muy populares para tractores pequeños con gamas mecánicas, o pa-

ra otras máquinas similares. Las transmisiones CVT eléctricas formadas por la combinación de un generador, un convertidor de potencia y un motor eléctrico alcanzan valores similares.

En relación a los requerimientos del mercado, la transmisiones CVT necesitan complementarse con cajas convencionales. Esto conduce a sistemas muy sofisticados de transmisión con tres tipos de desarrollos:

Las transmisiones CVT necesitan sistemas de división de la potencia

- Transmisiones CVT mecánicas ramificadas (a nivel de investigación y desarrollo).
- Transmisiones con ramifica-

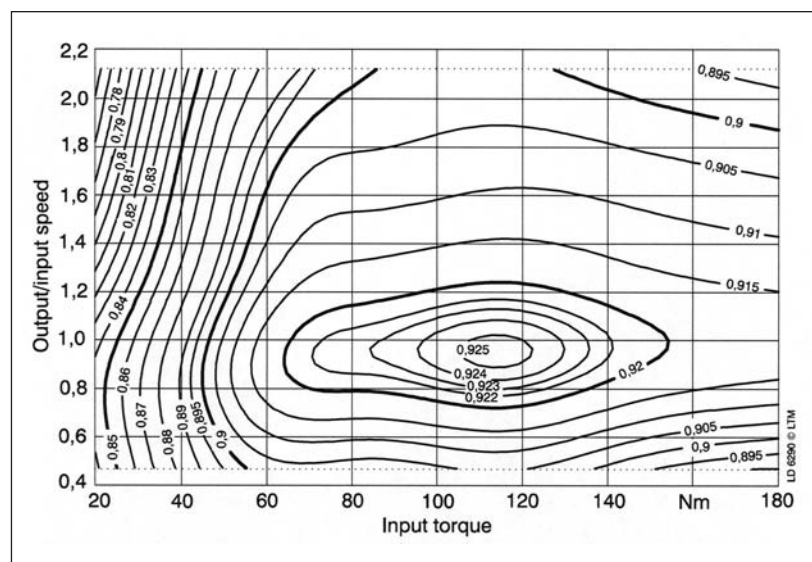


FIGURA 3: Diagrama de eficiencia medido en la Universidad Técnica de Munich en un variador de cadenas de una transmisión CVT en un prototipo de tractor.

Eje horizontal: Par de entrada en la transmisión (Nm).
Eje vertical: Relación de transmisión (velocidad de salida/velocidad de entrada).

ción de la potencia mecánica-hidrostática, que disponga de, al menos dos gamas, para incrementar la eficiencia del sistema.

- Transmisiones CVT eléctricas con, al menos, dos gamas (a nivel de investigación y desarrollo).

Este estado de la técnica demuestra la importancia de los conceptos relativos a la ramificación de la potencia, que son analizados en detalle en el documento de ASAE. De acuerdo con ellos, se pueden clasificar las transmisiones en dos grandes grupos:

- Ramificación interna (división y reunión de las dos ramas en el interior de la unidad CVT).
- Ramificación externa (división y reunión en el exterior de la unidad CVT).

En ambos casos sólo una cierta cantidad de la potencia es transmitida a través de la unidad CVT, mientras que el resto se transmite mecánicamente, alcanzando, por tanto, una eficiencia 'mixta' superior a la de la unidad CVT.

Las CVT con ramificación externa son más importantes que las internas, como consecuencia de su mayor flexibilidad y de otra serie de ventajas, aunque el primer ejemplo histórico (Renault, 1907) fuera un sistema muy ingenioso de ramificación interna.

Ambos sistemas se pueden clasificar de acuerdo con determinados elementos del sistema de

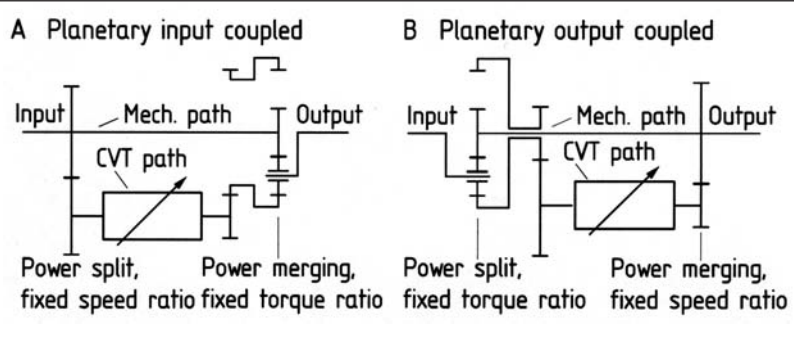


FIGURA 4: Transmisiones con ramificación de potencia, tipo externo. En la figura de la izquierda, tipo planetario sumador (*input coupled*). A la derecha, tipo planetario divisor (*output coupled*).

EL DESARROLLO ECONÓMICAMENTE VIABLE DE LAS TRANSMISIONES CON RAMIFICACIÓN DE LA POTENCIA PRECISA DEL APOYO DE HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

división y reunión de la potencia. En la Figura 4 aparecen los sistemas de ramificación externa.

El desarrollo económicamente viable de las transmisiones con ramificación de la potencia precisa del apoyo de herramientas de simulación que pueden, por ejemplo, ayudar a identificar pérdidas de potencia debidas a recirculación de la potencia o velocidades inusualmente elevadas de algún engranaje. También pueden prevenir de desagradables sorpresas en el estado de prototipo, ahorrando presupuestos adicionales debidos a cambios de estrategia en el diseño.

El trabajo presenta las eficiencias para los dos tipos de



FIGURA 5: Claas Xerion, actualmente con la transmisión CVT ramificada ZF Eccom (anteriormente se fabricaron unas pocas unidades equipadas con la transmisión CVT ramificada Claas-larchow HM-II).

transmisiones representadas en la Figura 4, conseguidas por simulación. Los resultados son completamente diferentes en los dos tipos. En ambos casos, las mejores eficiencias se consiguen en los puntos de bloqueo, cuando toda la potencia se transmite de modo mecánico, es decir, desarrollando el variador potencia nula. Las eficiencias son sólo aceptables en las proximidades de ese punto y caen considerablemente en el caso de la recirculación de potencia. Esta desventaja puede ser compensada sólo combinando la transmisión ramificada con cajas convencionales.

Transmisiones CVT con ramificación de potencia en tractores agrícolas

La temprana y muy interesante transmisión HM-8 con ramificación de la potencia y 7 gamas en serie (una directa) tenía muy poca proporción de potencia hidráulica. Esta transmisión fue desarrollada por Claas basada en una patente del experto alemán en este tipo de transmisiones, el profesor F. Jarchow (Figura 5). Era capaz de conseguir eficiencias aceptables, de acuerdo con el objetivo marcado en la Figura 2. La transmisión tuvo una producción baja y fue mejorada en una versión posterior, pero no fue producida en serie hasta 2005.

Los cuatro tipos de tractores de ruedas mundialmente comercializados, todos ellos del tipo de ramificación mecánica-hidrostática de la potencia, son los que aparecen en la Tabla 2 y corresponden todos al esquema de funcionamiento de la Figura 4.

Fendt utiliza el sistema de planetario divisor (*output coupled*) (Figura 6), mientras que los otros tres trabajan con el sistema de planetario sumador. Las cuatro transmisiones son anali-

zadas en profundidad en el trabajo. ZF y Steyr-ZF son muy parecidas, pero la de Fendt y la americana de John Deere son completamente diferentes y, al mismo tiempo, únicas. Estas dos últimas tienen en común el hecho de tener dos gamas cada una y unidades hidráulicas de cuerpo inclinado y elevada cilindrada, con eficiencias muy altas, mientras ZF y ZF-Steyr tienen 4 gamas y unidades hidráulicas de placa inclinada del tipo convencional debido a la menor proporción de la potencia hidráulica.

Desarrollo futuro

Las transmisiones hidrostáticas (con o sin ramificación de la potencia) continuarán incrementando su importancia en el mercado de los países desarrollados durante muchos años, porque representan una tecnología joven con un interesante futuro.

Se puede esperar que el principio de la ramificación de la potencia también aumente su importancia en otro tipo de máquinas. Por ejemplo, en el trabajo de ASAE destaca la primera transmisión en el mundo, con ramificación de la potencia, en una máquina autopropulsada,



FIGURA 6: Fendt Favorit 926, primer tractor estándar producido en serie con transmisión CVT con ramificación mecánico-hidrostática de la potencia (presentado en 1995 y fabricado desde 1996).

COMO TENDENCIAS A LARGO PLAZO, ES POSIBLE CONSIDERAR EL INCREMENTO DE LA IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS DE RAMIFICACIÓN MECÁNICA-ELÉCTRICA DE LA POTENCIA



FIGURA 7: Trasplantadora de arroz Yanmar, primera máquina agrícola autopropulsada fabricada con transmisión CVT ramificada (producida desde 2002).

una transplantadora de arroz de la empresa japonesa Yanmar (2002) (Figura 7).

Como tendencias a largo plazo, es posible considerar el incremento de la importancia de los sistemas de ramificación mecánica-eléctrica de la potencia. Existen varias líneas de investigación en ese sentido y hay que destacar que la primera

transmisión producida a gran escala para un vehículo es la Prius de Toyota (1997). También se estudia en el documento, porque ha iniciado o acelerado muchos desarrollos en el campo de los automóviles y otros sectores en automoción. Se espera que esta innovación contribuya a la reducción de costes en los componentes de alta tecnología de los

vehículos eléctricos, probablemente con efectos beneficiosos para los tractores y otras máquinas móviles. ■

 **PROF. DR. ING. DR. H.C. KARL**
TH. RENIUS

 **DR. ING. RAINER RESCH**

 **PROF. DR. ING. AGR.**
PILAR LINARES

Comentarios finales

En comparación con anteriores descripciones de las transmisiones CVT publicadas en *agrotécnica* observarán una diferencia en el sistema de clasificación propuesto por Renius y Resch. El concepto interno/externo es muy interesante, pero hay que matizar lo que se entiende por unidad CVT. En el trabajo de Renius y Resch, la unidad CVT es el variador, mientras que en artículos anteriores se ha considerado como unidad CVT el conjunto del nudo de entrada, el de salida y las dos ramas, la mecánica de relación de transmisión fija y la variable, que incluye el variador hidrostático. De ahí que la clasificación de CVT 'interna' indique que las dos ramas están dentro de la transmisión hidrostática, mientras que en la externa, ambos nudos están fuera de la transmisión hidrostática. Las transmisiones 'internas' no se han desarrollado comercialmente, de ahí que no se habían presentado en artículos anteriores.

En la clasificación de transmisiones con ramificación mecánica-hidrostática externa (Figura 4) sólo se contemplan las de planetario divisor y sumador. La técnica CVT progresa a velocidad 'continuamente' creciente y aunque el trabajo es de ¡Febrero de 2005!, en estos momentos, en vista de las innovaciones aparecidas en la serie 8030 de John Deere, habría que incluir en la clasificación la de tipo puente.

Siguiendo con conceptos relativos a la clasificación, el término 'directa' que emplean Renius y Resch sería el equivalente al tipo 'eje a eje'. Aunque éste último es muy intuitivo, hay que decir que es más elegante el 'directo'.

Ni en mis momentos de mayor optimismo me atrevería a entrar en el terreno de la recirculación de potencia en estas páginas, sin haber antes digerido mediante ensayos propios (si no lo veo, no lo creo) un concepto tan vidrioso como ese. En ello estamos. Nuestros colegas alemanes han podido hacer medidas en sus instalaciones de ensayo y con sus herramientas de simulación, por

lo que hablan con propiedad de ese tema, que está ahí y que alguna vez habrá que abordar sin miedo en estas páginas. En las líneas anteriores se transcriben, pues, sus opiniones, ya que, hasta ahora, no disponemos de propias.

Quiero destacar la afirmación del trabajo respecto a las eficiencias de las transmisiones del tipo planetario divisor y sumador. Coinciden con la idea preconcebida de que el máximo se sitúa en el punto de bloqueo. Era lo que en los albores de esta técnica se dijo y que el profesor Renius y el Doctor Resch mantienen. Sin embargo, la visita a las instalaciones de la fábrica de Fendt en Marktobendorf en 2003 hizo tambalear mis convicciones. Los bancos de ensayo de transmisiones disuaden de cualquier discrepancia de los resultados obtenidos por Fendt, en los que la máxima eficiencia (al menos en la Vario) no se produce en el punto de bloqueo.

La discusión puede venir por saber si las situaciones son comparables. Los sistemas de planetario sumador suelen llevar sólo una unidad de cilindrada variable, tipo placa inclinada, mientras que Fendt, en su sistema de planetario divisor lleva las dos unidades variables del tipo 'cuerpo inclinado'. Los ensayos de tractor completo a la barra en pista de ensayo no ayudan a resolver la cuestión, porque estos tractores, equipados con estrategias de conducción, se defienden como gato panza arriba del consumo elevado y se buscan la vida para encontrar un punto económico de funcionamiento, por lo que resulta muy difícil comparar los resultados. Buscar dos puntos de funcionamiento comparables (igual fuerza de tracción desarrollada, velocidad de avance, potencia) es más difícil de entender que lo de la recirculación de potencia, así que comparar eficiencias o consumos es arriesgadísimo. Tampoco puedo aportar más en ese sentido. Seguiremos estudiando y ensayando.

PILAR LINARES